

УДК 697.922

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ И КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В ЦЕХАХ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

О.Н. ШИРОКОВА

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены производственные процессы в литейных цехах, сопровождающиеся выделением в воздух помещений вредных паров, газов, пыли и тепла, которые могут влиять на самочувствие работающих в результате ухудшения состояния воздушной среды помещений. Показаны основные пути борьбы с выделением вредных веществ – совершенствование технологических процессов, создание безотходных производств или малоотходных технологических циклов. Выполнено физическое и математическое моделирование естественной вентиляции производственных помещений с точечными источниками теплоты методом аэрации с учетом условий внешней аэродинамики зданий и теплового режима внутри помещений с организованным и регулируемым воздухообменом. Разработана технологическая схема экранно-щитовой аэрации, ограничивающая тепловые горизонтальные воздействия на персонал в рабочей зоне и методика проведения исследований по определению эффективности действия с возможностью визуальной и инструментальной фиксации аэродинамических и теплотехнических параметров.

**Ключевые слова:** местная и общеобменная вентиляция, аэрация, естественная и вынужденная конвекция, моделирование, источник теплоты.

Литейное производство предприятий характеризуется значительными выделениями в атмосферу помещений вредных веществ (пыли, газов, избыточной влаги и теплоты), что оказывает отрицательное воздействие на здоровье работающих, а также на оборудование и строительные конструкции. При плавке 1 тонны металла из вагранки выбрасывается 1000 м<sup>3</sup>/ч газов с концентрацией окиси углерода до 25% и 10...25 кг пыли. Несколько меньше загрязняют воздушную среду дуговые сталеплавильные печи, при работе которых выделение газов достигает 250 м<sup>3</sup>/ч, а вынос пыли 2,3...3,6 кг/ч на 1 тонну выплавляемой стали.

Несмотря на совершенствование технологии производства, герметизацию газо- и пылевыводящего оборудования, теплоизоляцию и экранирование источников теплоты, часть выделяющихся вредных веществ проникает в производственные помещения. Результаты обследований микроклимата литейных цехов показывают, что нередко температура воздуха на рабочих местах превышает нормируемую на 10...15 °С. В этих условиях важнейшими средствами создания в рабочих зонах условий, соответствующих санитарно-гигиеническим нормам, является широкое применение местной вытяжной вентиляции и организация общего воздухообмена помещений. Общеобменная вентиляция литейных цехов организуется совместно с достаточно мощной местной вытяжной вентиляцией. Их рациональное сочетание позволяет поддерживать необходимый состав воздушной среды цеха при меньших расходах вентиляционного воздуха. Кроме того, общеобменная вентиляция литейных цехов применяется для регулирования их теплового режима – ассимиляции и отвода избытков теплоты в летний период и воздушного отопления в холодный период года [1].

Основные пути борьбы с выделением вредных веществ – совершенствование технологических процессов, создание безотходных производств или малоотходных технологических циклов. Для поддержания в производственных помещениях чистоты воздуха и метеорологических условий, удовлетворяющих санитарно-гигиеническим требованиям, устраивается вентиляция. В общем случае процесс аэрации как один из способов естественной вентиляции производственных помещений с теплоизбытками зависит от условий внешней аэродинамики здания и теплового режима внутри помещений. Для обеспечения активного воздухообмена при аэрации используется ветровой напор и разность температур наружного и внутреннего воздуха. Следует принять к сведению, что метод аэрации для удаления из помещений избытков теплоты будет эффективным только при низких температурах наружного воздуха, а при сближении температур наружного и внутреннего воздуха действие аэрации сводится к нулю, что требует устройства принудительной вентиляции, работающей дополнительно по параллельной схеме.

Наиболее часто применяемые в вентиляционной практике приемы расчета аэрации методами «нейтральной зоны» и «уровня нулевых давлений» в большинстве случаев оказываются неточными из-за неравномерности температур внутри помещений по причине изменяющихся параметров внешних воздействий (ветрового давления, направления ветра, температуры наружного воздуха, разрегулировки площади приточных и вытяжных отверстий, инфильтрации и т.д.) [2; 3].

Для определения естественного перепада давлений используется формула

$$\Delta P = h \cdot g \cdot (\rho - \rho_0) = h \cdot g \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta T, \quad (1)$$

в которой  $h$  – расстояние по вертикали между приточными и вытяжными отверстиями, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$ ,  $\rho_0$  – плотность наружного и внутреннего воздуха соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{273}$  – температурный коэффициент,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta T$  – разность температур внутреннего и наружного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

При моделировании аэрации применимо следующее критериальное уравнение:

$$\text{Eu} = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot \omega^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления в потоке, Па;  $\frac{\rho \cdot \omega^2}{2}$  – кинетическая энергия потока, Па.

После преобразования получим критериальное уравнение Архимеда:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot \omega^2} = \frac{h \cdot g \cdot \rho}{\rho \cdot \omega^2} \cdot \beta \cdot \Delta T = \text{Ar}.$$

Таким образом, критерий Архимеда является определяющим при рассмотрении процессов аэрации зданий, так как в его составе величины, входящие в условие однозначности.

Аэрацию следует рассматривать как процесс естественной конвекции, состоящей из двух групп: внешней и внутренней естественной конвекции. Под внешней конвекцией подразумевается явление теплоотдачи от нагретой поверхности теплоисточника в окружающую среду, а под внутренней – явление теплоотдачи в замкнутом воздушном пространстве через ограничивающие стенки (например, экранно-шторного укрытия) с фиксацией полей температур и скоростей аэродинамики воздушных восходящих конвективных потоков [4].

При больших сосредоточенных восходящих потоках над точечными источниками за счет естественной конвекции математическое моделирование осуществляется с использованием равенства

$$\text{Re}^2 = \text{Gr} / \text{Ar}, \quad (3)$$

где  $\text{Re} = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$  – критерий Рейнольдса;  $\text{Gr} = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$  – число Грасгофа;  $\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{273 + t_o}$  – температурный коэффициент,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $L$  – определяющий характерный линейный размер поверхности теплообмена, м;  $\Delta T = (t_c - t_o)$  – соответственно разность температур поверхности теплообмена и окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\text{Ar} = 1$  – критерий Архимеда.

Соотношение (3) подтверждает то обстоятельство, что единственным результатом работы подъемной силы является кинетическая энергия восходящего воздушного потока, величина скорости которого определяется по уравнению

$$\frac{\rho \cdot \omega^2}{2} = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Z, \quad (4)$$

из которого следует, что

$$\omega = \sqrt{2g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Z}.$$

Тогда значение критерия Re примет вид:

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \sqrt{\text{Gr} \cdot \frac{Z}{d}}, \quad (5)$$

где  $Z$  – расстояние по высоте от источника, м;  $d$  – диаметр восходящего потока, м.

Таким образом, теплообмен при естественной и вынужденной конвекции будет происходить в соответствии с критериальными уравнениями подобия (3) и (5) при соизмеримых скоростях воздушного потока.

Удаление вентиляционного воздуха при аэрации здания осуществляется через специальные аэрационные фонари с вытяжными отверстиями, расположенными выше крыши, или вытяжные шахты. Для количественного регулирования расхода вентиляционного воздуха в приточных и вытяжных отверстиях устанавливаются регулируемые решётки.

В процессе естественной циркуляции воздушных потоков внутри помещений горячих цехов с интенсивными тепlopоступлениями образуется несколько зон с различными температурами.

Для определения физической картины аэростатических, аэродинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в условиях изменяющихся температур, необходимо изначально представить помещение, как сосуд, заполненный газовойсмесью, тогда по законам аэростатики изменение давления  $dP$  в слое  $dh$  газа переменено по высоте и составляет

$$dP = \frac{\rho \cdot g}{F} \cdot dV, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность газа (воздуха),  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения помещения,  $\text{м}^2$ ;  $V = h \cdot F$  – объем столба газа (воздуха),  $\text{м}^3$ .

Так как  $dV = F \cdot dh$ , то выражение (6) будет иметь вид

$$dP = \rho g dh. \quad (7)$$

Интегрируя выражение (7), получим

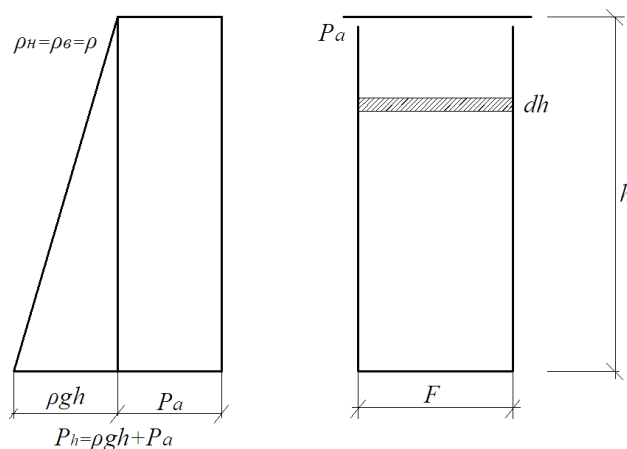
$$P_h = P_a - g \int_0^h \rho \cdot dh, \quad (8)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление на поверхности земли при  $h = 0$ .

В стационарных условиях без каких-либо теплопоступлений температура воздуха внутри помещения остаётся неизменной. Тогда и плотность воздуха постоянна, а после интегрирования выражение (8) примет вид

$$P_h = P_a - \rho g h, \text{ Па}. \quad (9)$$

Физическая картина описанных выше аэростатических процессов выражениями (6)...(9) представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1. – Изменение аэростатического давления по высоте помещения при равенстве значений температур воздуха внутри и снаружи помещения**

Если в рассматриваемом помещении установлен источник теплопоступлений 4 (рисунок 2), физическая картина кардинально изменяется при  $t_n < t_g$ . Линия I на графике (рисунок 2) соответствует изменению аэростатического давления снаружи здания согласно выражению  $P_n = P_a - \rho_n g h$ , а линия II – изменению аэростатического давления внутри здания  $P = P_a - \rho g h$ , тогда оставшаяся заштрихованная часть графика будет соответствовать перепаду аэростатических давлений снаружи и внутри здания, то есть

$$\Delta P = P_n - P_g = P_a + \rho_n g h - P_a - \rho_g g h, \quad (10)$$

откуда после преобразований получим

$$P_{cp} = \Delta P = g h (\rho_n - \rho_g). \quad (11)$$

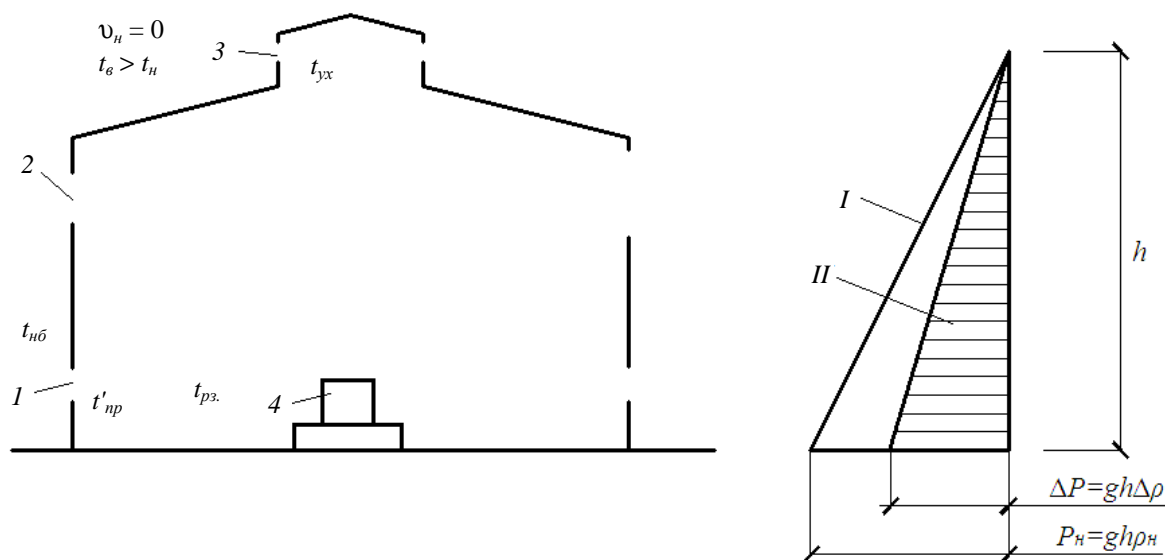
На графике (рисунок 2) заштрихованная часть является расчётной эпюрой избыточного гравитационного (аэростатического) давления при действии только сил гравитации.

В процессе естественной циркуляции воздушных потоков внутри помещений с теплоизбытками образуется несколько характерных зон с различными температурами.

При аэрации зданий снаружи помещений с теплоизбытками принимается наружная температура  $t_{нв}$  воздуха для расчёта вентиляции летнего и зимнего периодов года.

Температура воздуха внутри помещений со стороны приточных отверстий  $t_{np}$  принимается на  $+5^\circ\text{C}$  выше, чем температура наружного воздуха.

Суммарное воздействие на здание гравитационного  $P_{гр}$  и ветрового  $\Delta P_v$  давлений определит построение эпюр давлений на здание для летнего и зимнего периодов года.



1 – приточные отверстия летом; 2 – приточные отверстия зимой; 3 – вытяжные отверстия

Рисунок 2. – Изменение аэростатического давления по высоте помещения при  $t_n < t_e$

На рисунке 3 выполнено построение эпюр давлений для летнего и зимнего периодов года при совместном воздействии на здание гравитационного  $P_{гр}$  и ветрового  $\Delta P_v$  давлений, формирующих тепловой и воздушный режимы зданий при аэрации.

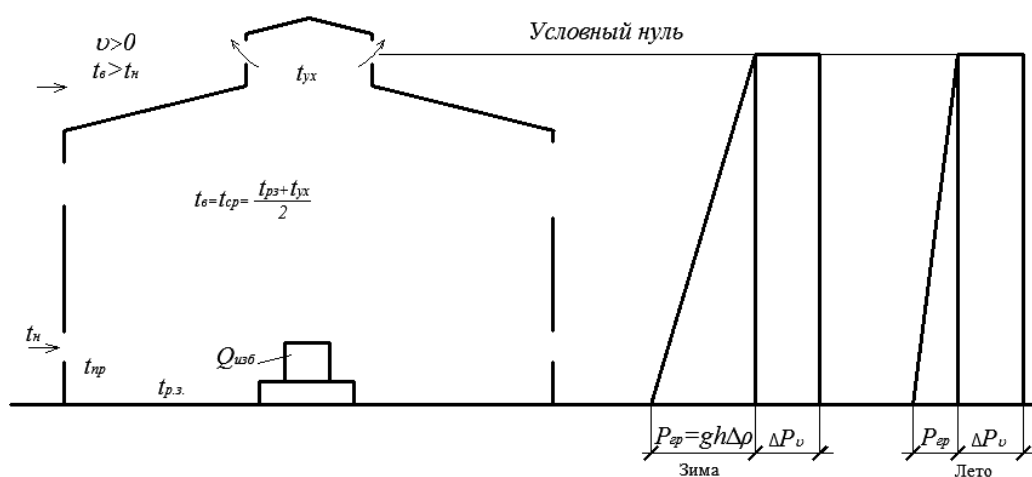
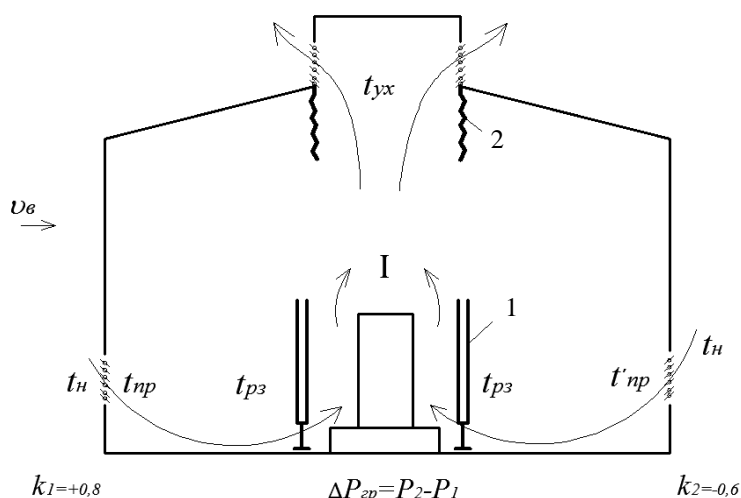


Рисунок 3. – Построение эпюры давлений при совместном воздействии гравитационного и ветрового давлений на здание летом и зимой

Динамические процессы в горячих цехах тесно связаны с тепломассообменом. Суммарные тепловыделения от нагретых поверхностей печей остывающего и расплавленного металла осуществляются за счёт конвекции и лучеиспускания [5–7]. В целях снижения вредного воздействия на персонал высоких

температур от нагретых поверхностей активных источников тепlopоступлений предлагается в горячих цехах применять технологическую схему управляемой экранно-шторной аэрации, ограничивающей зону высоких температур от рабочей зоны помещений так, как это показано на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Схема управляемой экранно-шторной аэрации, ограничивающей тепловые горизонтальные воздействия в рабочей зоне, с возможностью перемещения избыточной теплоты восходящими вертикальными конвективными потоками I, формирующими циркуляцию внутри здания**

Легкие переносные экраны 1, выполненные из листовых материалов, хорошо отражающих лучистую энергию от расплавленного металла или нагретых поверхностей оборудования горячих цехов (например, алюминиевой фольги с жестким каркасом из профильного металла), создадут экранированную защиту рабочей зоны. Шторы 2 из термостойкого материала (например, из стеклоткани) спускающиеся сверху от конструкции аэрационного фонаря или вытяжной шахты, установленной на крыше, позволяют максимально изолировать рабочую зону от активного воздействия проникающей тепловой радиации от горячих источников, от которых вверх поднимаются конвективные потоки перегретого воздуха.

Предлагаемые технические решения для борьбы с тепловой радиацией от источника теплоты горячих цехов отличаются от всех известных аналогичных устройств простотой конструктивного исполнения, экономичностью в изготовлении, малой массивностью, мобильностью в эксплуатации, так как их конструкции могут перемещаться по цеху в пространстве по площади и по высоте и при необходимости устанавливаться в любом месте или демонтироваться на некоторое время. Высота экранов 1, а также глубина свесов штор 2 может регулироваться при необходимости для достижения максимального эффекта локализации тепловых воздушных потоков и вывода избыточной теплоты из рабочей зоны горячих производственных помещений.

В процессе экспериментальных исследований изменялись параметры мощности теплового потока от источника теплоты, расстояние переносных экранов 1 и свес штор 2 от теплоисточника по горизонтали и высоте и одновременно фиксировались визуально и инструментально температуры и расходы воздуха в сечении шторного укрытия 2, которые изменялись в зависимости от мощности источника теплоты. Скорость воздуха фиксировалась крыльчатым анемометром в сечении вытяжного зонта.

Параметры микроклимата в рабочей зоне фиксировались психрометром и термопреобразователями сопротивления ТС-Б типа Pt 100, подключенными к устройству УКТ38-Щ4-ТС для измерения и контроля температуры.

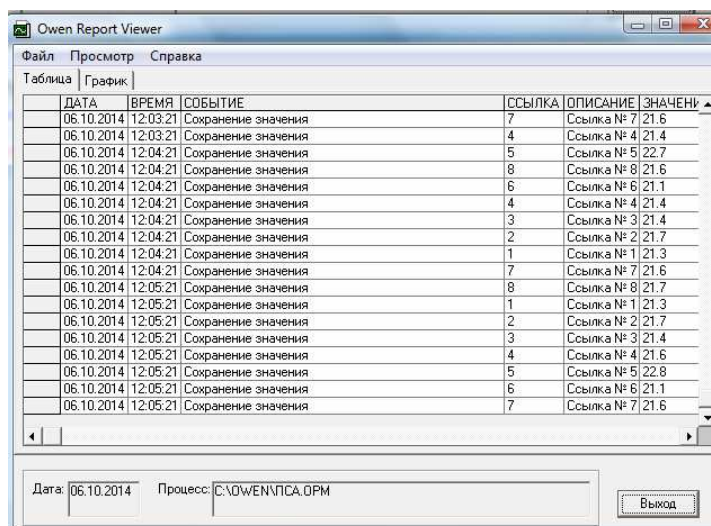
Система сбора и обработки информации реализовалась в виде двухуровневого программно-аппаратного комплекса. При этом на нижнем уровне сбора информации использовались термопреобразователи сопротивления, объединенные через контроллер с помощью последовательного интерфейса RS-232 с компьютером. Программно-аппаратный комплекс верхнего уровня состоит из компьютера и программы. Передача данных на верхний уровень производилась непосредственно по магистралям RS-232. Для наблюдения и архивирования данных использовался пакет программ Owen Process Manager 1. X. с отображением результатов (рисунок 5).

В процессе моделирования учтены условия геометрического, аэродинамического и термодинамического подобия. Геометрическое подобие осуществлено путем масштабирования модели и натур. Аэроди-

намическое подобие выполнено за счет равенства критерия Рейнольдса, а термодинамическое подобие модели и натуры осуществлялось путем равенства критерия Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}, \quad (12)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $L$  – линейный размер, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·°С.

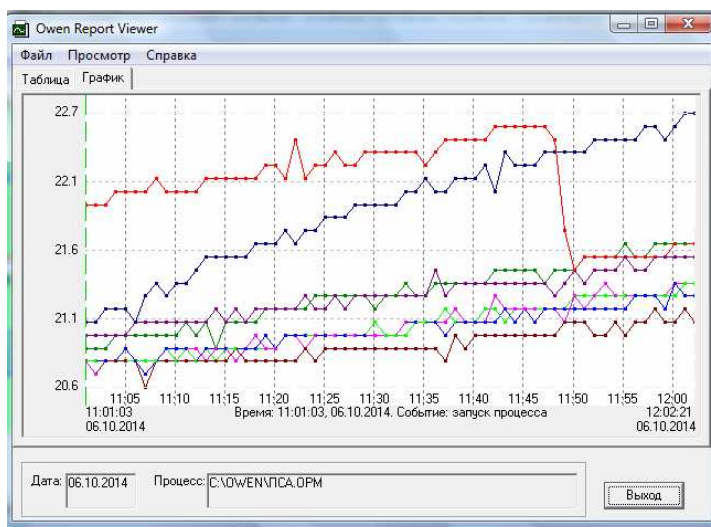


The screenshot shows the 'Owen Report Viewer' window with the 'Таблица' (Table) tab selected. The table contains the following data:

ДАТА	ВРЕМЯ	СОБЫТИЕ	ССЫЛКА	ОПИСАНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
06.10.2014	12:03:21	Сохранение значения	7	Ссылка № 7	21.6
06.10.2014	12:03:21	Сохранение значения	4	Ссылка № 4	21.4
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	5	Ссылка № 5	22.7
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	8	Ссылка № 8	21.6
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	6	Ссылка № 6	21.1
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	4	Ссылка № 4	21.4
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	3	Ссылка № 3	21.4
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	2	Ссылка № 2	21.7
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	1	Ссылка № 1	21.3
06.10.2014	12:04:21	Сохранение значения	7	Ссылка № 7	21.6
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	8	Ссылка № 8	21.7
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	1	Ссылка № 1	21.3
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	2	Ссылка № 2	21.7
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	3	Ссылка № 3	21.4
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	4	Ссылка № 4	21.6
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	5	Ссылка № 5	22.8
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	6	Ссылка № 6	21.1
06.10.2014	12:05:21	Сохранение значения	7	Ссылка № 7	21.6

At the bottom, the date is set to 06.10.2014 and the process path is C:\OWEN\ПСА.DPM. A 'Выход' (Exit) button is visible.

а



б

Рисунок 5. – Главное окно программы сбора информации в файлы протоколов (а) и обработки информации в графическом виде (б)

Обработка данных выполненных экспериментов по оценке эффективности действия экранно-шторной аэрации определится на основании критериальных зависимостей теории подобия аэродинамических и теплообменных процессов с целью оптимизации режимных параметров эксплуатации [8–9].

#### Основные выводы

1. При аэрации цехов с теплоизбытками на формирование воздушных потоков совместное влияние оказывают силы гравитации с направленным движением «снизу – вверх» и горизонтально направленные перемещения воздушных масс под действием ветрового давления.

2. Тепловое воздействие на работающих от нагретых поверхностей происходит как за счет лучеиспускания, так и конвекции, что вызывает дискомфорт в рабочей зоне.

3. Предлагаемые технические решения для борьбы с тепловой радиацией от источника теплоты литейных цехов с целью защиты работающих отличаются от всех известных аналогичных устройств

простотой конструктивного исполнения, экономичностью в изготовлении, малой массивностью, мобильностью в эксплуатации, так как их конструкции могут перемещаться по цеху в пространстве по площади и по высоте и при необходимости устанавливаться в любом месте или демонтироваться на некоторое время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обеспыливание в литейных цехах машиностроительных предприятий / В.А. Минко [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
2. Рысин, С.А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов : справочник / С.А. Рысин. – М. : Машиздат, 1964. – 704 с.
3. Внутренние санитарно-технические устройства : в 2-х ч. / под ред. И.Г. Старовойтова. – М. : Стройиздат, 1978. – 510 с.
4. Королёва, Т.И. Управление конвективными потоками для удаления вредностей от источников теплогазовыделений / Т.И. Королёва, О.Н. Широкова // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2010. – № 1(18). – С. 119–124.
5. Королёва, Т.И. Моделирование свободных конвективных потоков от линейных источников теплоты / Т.И. Королёва, О.Н. Широкова // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2015. – С. 277–278.
6. Широкова, О.Н. Методические разработки к расчету управляемой аэрации цехов с теплоизбытками для нормализации микроклимата / О.Н. Широкова, В.И. Липко // Материалы докл. 49 Междунар. науч.-практ. конф. преподавателей и студентов : в 2 т. / ВГТУ. – Витебск, 2016. – С. 315–317.
7. Широкова, О.Н. Основы теории аэростатики, аэродинамики, тепломассообменных процессов и методики расчета аэрации цехов с теплоизбытками / О.Н. Широкова, В.И. Липко // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. / БрГТУ. – Брест, 2016. – С. 290–297.
8. Широкова, О.Н. Экспериментальный стенд и методика исследования эффективности действия экранно-шторной аэрации от теплового воздействия точечного теплоисточника / О.Н. Широкова, В.И. Липко // Материалы докл. 50 Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвящ. году науки : в 2-х т. / ВГТУ. – Витебск, 2017. – С. 322–324.
9. Липко, В.И. Моделирование аэрации производственных цехов с точечными источниками тепловыделений / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. году науки / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2017. – С. 223–226.

Поступила 06.12.2017

## MODELLING THE INTERACTION OF VENTILATION AND CONVECTION THREADS IN THE SHOPS OF THE FOUNDRY

**O. SHIROKOVA**

*Examined production processes in foundries shopfloor, accompanied by the release into the indoor air of harmful vapours, gases, dust and heat, which can affect the health working in the degradation of the air environment of premises. The main ways of combating emissions are: improvement of technological processes, the creation of non-waste or low-waste production technology cycles. Performed physical and mathematical modeling of natural ventilation in production areas with point sources of heat aeration method subject to the conditions of the external aerodynamics of buildings and the thermal mode in premises with an organized and regulated exchange. Design the technological scheme of the screen-curtain aeration limiting horizontal thermal impact on the working in the working area and methods of research to determine the effectiveness of actions with the possibility of visual and instrumental fixation of the aerodynamic and thermal parameters.*

**Keywords:** local and general ventilation, aeration, natural and forced convection, model analysis, heat source.